

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРЕВЕНТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТЕХНОЛОГИИ WiMAX В УСЛОВИЯХ ПЕРЕГРУЗОК

© 2013 г. С.В. ГАРКУША, АХМЕД ХАССАН АБЕД

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В настоящее время в современных беспроводных телекоммуникационных сетях (БТС), в частности и в сетях технологии WiMAX, численные значения отдельных показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS), одним из которых является гарантируемая скорость передачи данных, во многом определяют эффективность решения задачи управления трафиком [1, 2]. При этом в условиях гетерогенности и мультипротокольности современных БТС, а особенно при перегрузке и ограниченности частотных и временных ресурсов, на первое место выходит проблема повышения уровня согласованности решений задач распределения пропускной способности нисходящего канала связи между пользовательскими станциями (Subscriber Station, SS) и ограничения интенсивности трафика, поступающего в сеть. При этом также необходимо учитывать возможность предоставления каждому сервисному потоку (Service Flow, SF) на подуровне MAC канального уровня сети требуемого QoS. Кроме того, учитывая мультисервисный характер современных БТС, отказы в обслуживании должны касаться в первую очередь низкоприоритетного трафика.

Как показал проведенный анализ, известные методы распределения пропускной способности нисходящего канала связи в технологии WiMAX используют принцип Best Effort. При этом качество предоставляемых услуг не гарантировано, а между SS распределяется вся доступная пропускная способность [2]. Однако в технологии WiMAX кроме Best Effort поддерживается несколько классов обслуживания (Class of Service, CoS) среди которых выделяют Not Real Time, Real Time, Extended Real Time, Unsolicited Grant Service, ориентированных на выделение гарантированной пропускной способности.

Таким образом, актуальной научной и практической задачей является разработка и исследование математических моделей и методов распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX, гарантирующих выделение пользовательским станциям и их сервисным потокам требуемой пропускной способности, которые могли бы быть положены в основу перспективных технологических решений. В результате этого была разработана математическая модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX.

В ходе решения задачи планирования пакетов данных для передачи сервисных потоков всех пользовательских станций в нисходящем канале связи в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчёт булевой управляющей переменной ( $x_{k,m}^n$ ), определяющей порядок распределения слотов:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й слот на } k\text{-м подканале выделен } n\text{-й SS;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Кроме того вводится также величина  $\alpha^n$ , моделирующая долю отказов в выделении необходимой пропускной способности [3]. Тогда вектор искомых параметров с учетом (1) удобно представить в форме:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_{k,m}^n \\ \vdots \\ \alpha^n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Координатами вектора  $\bar{X}$  является множество переменных  $x_{k,m}^n$ , где  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , и ряда параметров  $\alpha^n$ , где  $n = \overline{1, N}$ . При этом множество переменных  $x_{k,m}^n$  будет определяться выражением  $N \times M \times K$ , где  $N$  – общее количество сервисных потоков, передаваемых всеми SS,  $M$  – количество слотов на одном подканале нисходящего канала для передачи полезной информации,  $K$  – количество подканалов в частотном канале, а количество параметров  $\alpha^n$  будет равно  $N$ .

В соответствии с результатами расчёта переменных (2) производится закрепление подканалов и распределение слотов за сервисными потоками SS, на которых будут передаваться данные в нисходящем канале. Кроме того, при расчёте вектора исходных параметров  $\bar{X}$  необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений:

1) Условие закрепления  $k$ -го подканала на протяжении передачи  $m$ -го слота не более чем за одним сервисным потоком

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1 \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}); \quad (3)$$

2) Условие закрепления за  $n$ -м сервисным потоком количества слотов, обеспечивающего необходимую пропускную способность при схеме модуляции и кодирования, используемой соответствующей SS

$$R_S^n \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{k,m}^n \geq R_{\text{треб}}^n (1 - \alpha^n) \quad (n = \overline{1, N}), \quad (4)$$

где  $R_S^n = \frac{SR_c^n k_b^n K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g)L + T_{\text{RTG}} + T_{\text{TRG}}}$  – пропускная способность одного слота, закрепленного

за  $n$ -м сервисным потоком, которая зависит от MCS, используемой соответствующей SS, и представляет собой количество переданных бит за время, равное длительности слота;  $R_c^n$  – скорость кода, используемого при кодировании сигнала  $n$ -го сетевого потока соответствующей SS;  $k_b^n$  – битовая загрузка символа  $n$ -го сервисного потока соответствующей SS;  $K_s$  – число поднесущих для передачи данных в одном подканале;  $T_{\text{RTG}} = 105,7$  мкс – длительность интервала переключения с приема на передачу (receive/transmit transition gap, RTG);  $T_{\text{TRG}} = 60$  мкс – длительность интервала переключения с передачи на прием (transmit/receive transition gap, TRG).

3) Условия формирования одного пакета для  $n$ -го сервисного потока соответствующей SS, что позволяет минимизировать количество слотов, выделенных для передачи служебной информации

$$x_{k,i}^n x_{k,z}^n (i - z + 1) - \sum_{u=z}^i x_{k,u}^n \leq 0, \quad \text{при } (z = \overline{1, M-1}; i = \overline{2, M}; n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; i > z); \quad (5)$$

$$x_{j,m}^n x_{r,m}^n (j - r + 1) - \sum_{s=r}^j x_{s,m}^n \leq 0, \quad \text{при } (r = \overline{1, K-1}; j = \overline{2, K}; n = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}; j > r); \quad (6)$$

4) Условие формирования пакетов «прямоугольной формы», соответствующее технологическим особенностям семейства стандартов IEEE 802.16, использующих OFDMA

$$x_{k,m}^n \sum_{d=1}^M x_{k,d}^n \sum_{b=1}^K x_{b,m}^n = x_{k,m}^n \sum_{g=1}^K \sum_{h=1}^M x_{g,h}^n, \quad \text{при } (n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}); \quad (7)$$

5) Условия резервирования необходимого количества слотов для передачи служебной информации

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n = 0, \text{ при } (m = \overline{1, m_{\text{служ}}} - 1, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k, m_{\text{служ}}}^n = 0, \text{ при } (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k,1}^n = 0, \text{ при } (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil < 1), \quad (10)$$

где  $m_{\text{служ}} = \lceil Q/K \rceil$  – количество слотов, выделенных для передачи служебной информации и занимающих всю ширину частотного канала (располагаются вначале кадра после преамбулы);  $k_{\text{служ}} = Q - K(m_{\text{служ}} - 1)$  – количество слотов выделенных для передачи служебной информации, занимающих лишь часть ширины частотного канала.

При выполнении условий (8)-(10) производится резервирование слотов для передачи служебной информации. Кроме того условия (8) и (9) используются, в случае если количество слотов, необходимое для передачи служебной информации, превышает или равно числу подканалов в частотном канале  $\lceil Q/K \rceil \geq 1$ . Также условие (8) позволяет произвести резервирование всех подканалов на протяжении передачи количества слотов равного  $m_{\text{служ}}$ , для передачи служебной информации. Условия (9) и (10) резервируют лишь часть подканалов  $k_{\text{служ}}$  на протяжении длительности одного слота.

В соответствии с физикой решаемой задачи (1)-(10) на координаты  $\alpha^n$  вектора  $\vec{X}$  накладываются следующие ограничения [3]:

$$0 \leq \alpha^n \leq 1 \quad (11) \text{ или } \alpha^n \in \{0,1\}, \quad (12)$$

если на основе соглашения об уровне предоставляемых услуг (Service Level Agreement, SLA) допускается (11) или не допускается (12) частичное ограничение требуемой скорости передачи.

Расчет искомых переменных (2) в соответствии с условиями-ограничениями (3)-(12) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум линейной (13) или линейно-квадратичной (14) целевых функций [3]:

$$\min_{\vec{X}} C^t \vec{X} = \min_{\vec{X}} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\sum_{n=1}^N c_{k,m}^n x_{k,m}^n + \sum_{n=1}^N c^n \alpha^n), \quad (13)$$

$$\min_{\vec{X}} \left[ \frac{1}{2} \vec{X}^t H \vec{X} + C^t \vec{X} \right], \quad (14)$$

характеризующих относительные стоимости распределения пропускных способностей на этапе планирования пакетов данных. Координаты вектора  $\vec{C}$  и  $H$  матрицы можно представить следующим образом:

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} c_{k,m}^n \\ \dots \\ c^n \end{bmatrix} \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N}), \quad (15) \quad H = \begin{bmatrix} \mu c_{11}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu c_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu c_{k,m}^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu c^n \end{bmatrix} \quad (16)$$

Координаты вектора  $\vec{C}$  определяют величину удельного штрафа за использование слотов нисходящего канала связи ( $c_{k,m}^n$ ) и за ограничение в обслуживании трафиков пользователей ( $c^n$ ), при условии, что  $c_{k,m}^n \ll c^n$ ,  $\mu$  – коэффициент, опреде-

ляющий во сколько раз координаты диагональной матрицы  $H$  больше (меньше) координат вектора  $\vec{C}$ .

Проведен анализ процесса планирования пакетов данных нисходящего канала при совместном обслуживании двух сервисных потоков, которые направляются одной пользовательской станцией, с разными приоритетами, задающиеся путем изменения значения соотношения  $\Delta C = c_{k,m}^n / c^n$ . В процессе исследования установлено, что характер возможных отказов при использовании предложенной модели (1)-(11), (13)-(15) зависит, во-первых, от количества пользовательских станций и используемой этими станциями MCS. Во-вторых, от отношения стоимостей за загруженность нисходящего канала связи ( $c_{k,m}^n$ ) к стоимости за ограничение в обслуживании трафиков пользователей ( $c^n$ ).

При решении задачи планирования пакетов данных в нисходящем канале связи в качестве исходных данных были использованы следующие: количество сервисных потоков –  $N = 2$ ; используемый подрежим OFDMA – DL FUSC; количество подканалов в одном канале –  $K = 32$  (определяется подрежимом OFDMA); количество поднесущих для передачи данных на один подканал –  $K_s = 48$  (определяется подрежимом OFDMA); частотный разнос между поднесущими –  $\Delta f \approx 11,16$  КГц; вид MCS сигнала SS – 16 QAM 1/2; требуемая скорость передачи ( $R_{\text{треб}}$ ) для обслуживания каждой SS изменялась в пределах  $0 \div 16$  Мбит/с; вероятность блоковой ошибки –  $BLER = 0$ ; длительность кадра – 5 мс; длительность защитного интервала относительно длины полезной части символа –  $T_g = T_b / 8 = 11,2$  мс; количество символов в кадре –  $L = 49$ ; количество символов, формирующих один слот –  $S = 2$  (определяется подрежимом OFDMA); отношение длительности нисходящего канала к длительности восходящего канала – 3:1 ( $U = 3/4$ ).

Так ниже на Рис. 1 и Рис. 2 представлены зависимости доли отказов в выделении необходимой пропускной способности высокоприоритетного ( $\alpha^1$ ) и низкоприоритетного ( $\alpha^2$ ) сервисных потоков для линейной и линейно-квадратичной целевых функций соответственно. Результаты анализа показали, что в рамках предложенной модели реализуется обслуживание запросов от SS на основе так называемых абсолютных приоритетов. Так при использовании линейной целевой функции, в случае когда сумма запросов на требуемую скорость передачи превышает пропускную способность нисходящего канала связи превентивное ограничение испытывает в первую очередь запрос от низкоприоритетного сервисного потока вплоть до полного отказа в доступе (Рис. 1, б). Запрос на скорость передачи от сервисного потока с более высоким приоритетом не будет ущемляться до тех пор, пока можно отказать низкоприоритетному запросу (Рис. 1, а).

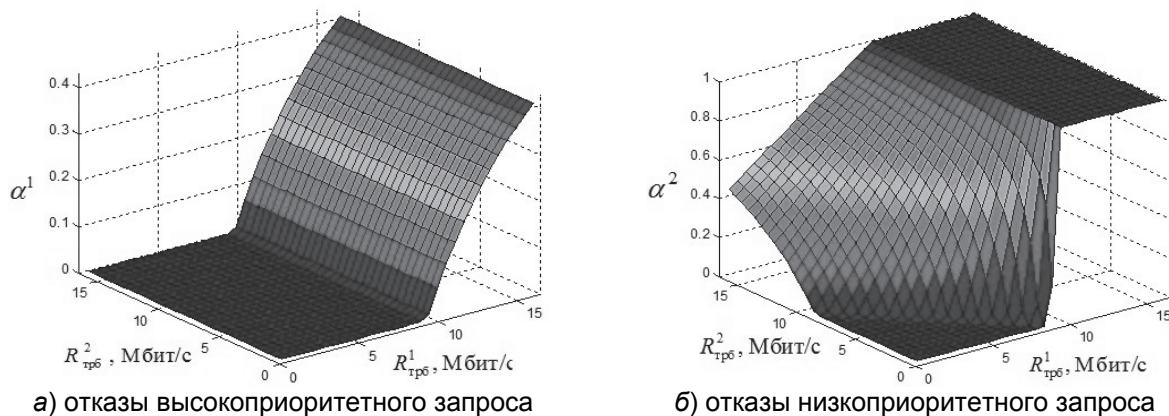


Рис. 1. Зависимость доли отказов от их запросов на требуемую скорость передачи при линейной целевой функции.

При использовании линейно-квадратичной целевой функции организуется более справедливое управление на основе относительных приоритетов, чем при использовании линейной целевой функции. Т.е. в случае возможной перегрузки отказы в обслуживании касаются всех сервисных потоков, при этом в меньшей степени высокоприоритетного (Рис. 2, а), а в большей – низкоприоритетного (Рис. 2, б). При этом в модели заложена возможность настройки как степени превентивности ограничения трафика, поступающего в сеть, как путем изменения весовых коэффициентов, так и степени процентного соотношения величины возможных отказов в обслуживании высокоприоритетного трафика относительно низкоприоритетного путем изменения значения множителя  $\mu$  диагональной матрицы  $H$ .

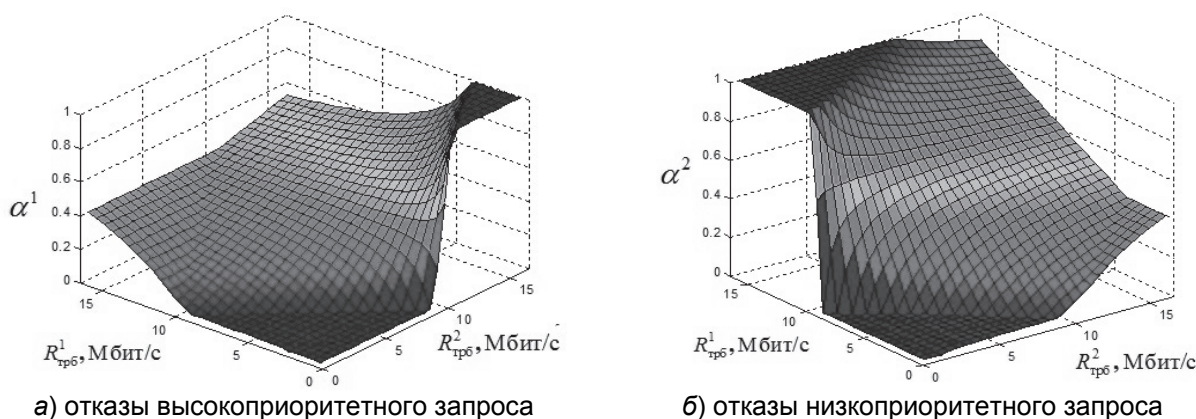


Рис. 2. Зависимость доли отказов от их запросов на требуемую скорость передачи при линейно-квадратичной целевой функции.

### Выводы

Предложена математическая модель, новизна которой заключается в возможности превентивного ограничения скорости передачи, выделенной сервисным потокам пользовательских станций в нисходящем канале связи технологии WiMAX путем использования линейной или линейно-квадратичной целевой функции, организующих управление запросами на основе относительных приоритетов. В результате анализа решений, получаемых с использованием предложенной модели, установлено, что обслуживание запросов от сервисных потоков пользовательских станций реализуется на основе так называемых абсолютных приоритетов. Так в случае когда сумма запросов от сервисных потоков пользовательских станций превышала пропускную способность нисходящего канала связи превентивное ограничение испытывал в первую очередь запрос от низкоприоритетного сервисного потока вплоть до полного отказа в доступе. Запрос на скорость передачи от сервисного потока с более высоким приоритетом не ущемлялся до тех пор, пока можно было отказать низкоприоритетному запросу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garkusha S., Ahmed H. Abed Slot Allocation Model and Data Burst Scheduling in Downlink WiMAX Technology // CADSM'2013 / Proc. of "12th International Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics". – Svalyava-Polyana, 2013. – P. 97-100.
2. Гаркуша С.В. Модель планирования пакетов данных в технологии WiMAX // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2013. – С. 74-77.
3. Лемешко А.В. Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев // Проблеми телекомунікацій. № 2 (2), 2010. – С. 33-41.